

## 継目無鋼管熱間肉厚測定装置に関する研究

著者	舩生 豊
号	959
発行年	1987
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11908">http://hdl.handle.net/10097/11908</a>

氏 名 舩 生 豊

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 63 年 2 月 10 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 37 年 3 月

東北大学工学部電子工学科卒業

学 位 論 文 題 目 継目無鋼管熱間肉厚測定装置に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 村上 孝一 東北大学教授 竹田 宏

東北大学教授 樋口 龍雄

## 論 文 内 容 要 旨

### 1 緒 言 (第 1 章)

継目無鋼管の製造技術は、その圧延工程に複雑な 3 次元塑性加工プロセスを持つために、鋼板の製造技術に比較して、圧延現象の塑性加工理論からの解析が困難であり、大幅に遅れていた。

しかし、近年、石油危機を契機として、継目無鋼管の油井管やラインパイプとしての需要が増大し、その製造工程の自動化による製造原価の低減と、油井管、機械構造用鋼管に於いては、最重要品質として寸法精度の向上が要請されるようになってきた。

ところが、回転圧延という 3 次元塑性加工プロセスを持つが故に、鋼管の肉厚の不均一いわゆる偏肉の発生を防止することができず、寸法精度上大きな問題となっていた。

この偏肉を低減する上で大きな障害の一つは、肉厚を熱間オンラインで測定する手段を持たなかったことであった。この肉厚測定は、

- (1) 鋼管が閉じた断面形状をしている。
- (2) 測定対象が  $800^{\circ}\sim 1000^{\circ}\text{C}$  の高温であり、熱負荷が大きい。
- (3) 鋼管搬送時に材料の回転や揺動が発生し、測定時の材料の安定性に問題が多い。
- (4) 鉄粉、ダスト、フューム等が存在し、劣悪な測定環境である。

等の困難な条件により、世界的に見ても研究例がなく、継目無鋼管の圧延現象の理論的解析や寸法精度の向上あるいは製造工程の自動化の面から、最重要な課題であるにもかかわらず、この肉厚測

定の研究は未着手の状況にあった。従って、この研究により世界初の実用化に成功すれば、その意義は極めて大きいと言える。

本研究の目的は、鋼管の肉厚測定のための新しい原理、方法を研究し、その原理を用いた高信頼度のオンライン装置の開発を行い、それを実ラインに適用し、圧延現象の解明や寸法精度の向上に寄与することである。従って、本研究は、鋼管の肉厚測定装置の研究とそれをプロセス制御システムに組み入れてオンライン適用する応用研究とから構成される。

## 2 肉厚の測定原理

鋼管の肉厚測定に関して、冷間工程であれば、超音波等を利用した接触式ないし準接触式の方法が可能と思われるが、熱間でかつ走行状態での測定は、前述のとおり、熱負荷、粉塵、材料の蛇行回転等の劣悪な環境、悪条件が重なり、全く新しい測定原理にまでさかのぼった研究が必要であった。

新しい測定方法としては、非接触方式が望ましく、かつ測定対象と測定装置との間に十分な距離を確保できる放射線透過方式が有利であると結論した。さらに、肉厚が最大40mmに達することから、放射線源として強い透過能力を持つ $\gamma$ 線源を採用することを決定した。このような基本的枠組みの中で、最初に着想を得て考案した測定原理がスキャンニング方式である。

### 2-1 スキャンニング方式（第2章、第3章）

この方式では、図1に示すように、一組の線源と検出器を測定対象である鋼管の断面方向に走査すると、その鋼管のダブルウォール（2重の肉厚）に従った厚みに対応した放射線の減衰曲線が得られる。鋼管の外径および内径に相当した位置でダブルウォールが急変するため、得られる減衰曲線もそれに対応した急変部のあるパターンを示す。この急変する位置から外径と内径の差である肉厚を求めるものである。これは、放射線の減衰量の絶対値を求めるものでなく、その変化状態を利用するいわゆるパターン方式である。

この方式で透過肉厚に対応した $\gamma$ 線の検出量 $N$ は、走査方向を $Y$ とし、走査の出发点 $Y_1(t_1)$ 、肉厚分布 $X(Y)$ 、走査速度 $V$ 、ビーム幅 $\Delta Y$ 、サンプリング時間 $T$ 、吸収係数 $\mu$ とすれば、次式で与えられる。

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{T \cdot \Delta Y} \int_{t_1}^{t_1 + T} \int_{Y_1(t) - \frac{\Delta Y}{2}}^{Y_1(t) + \frac{\Delta Y}{2}} e^{-\mu X} dY dt \quad \dots\dots (1)$$

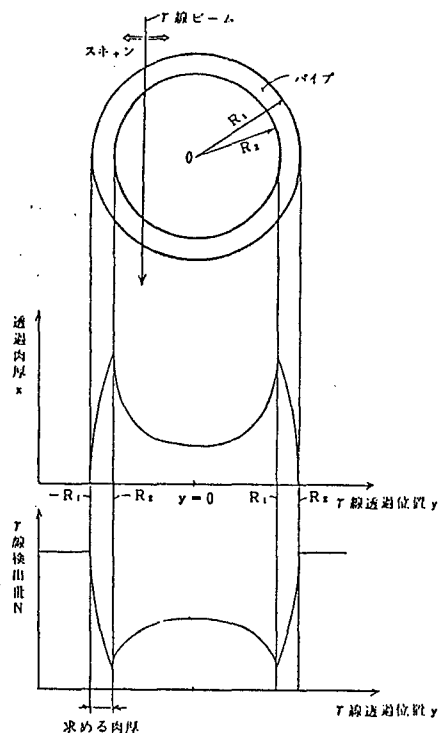


図1 スキャンニング方式原理図

ただし、 $X = X(Y)$   
 $Y_1 = Vt + Y_0 \quad V, Y_0 = \text{const.}$   
 $N_0$ : 肉厚零の時の  $r$  線検出量

である。

この方式は、その測定原理から、

- (1) 非接触測定が可能である。
- (2) 測定対象の中心と測定系の中心の一致が不要であり、測定系の位置設定の自由度が大である。
- (3) パターン計測であるため、ドリフトの補償が必要ない。

等の利点があるが、

- (1) 走査機構が複雑となり、重量のある測定系を移動させるため、間欠的測定となり、連続測定は不可能である。
- (2) 走査機構の駆動系の速度制限により測定の応答が決定され、高速応答は困難である。

等の欠点のあることを明らかにした。

さらに、計算機によるシュミレーションと実験装置による各種実験結果から、測定精度は、目標とする  $\pm 0.1 \text{ mm}$  の実現が可能であるが、応答は、1回の走査に最短 4 sec を要し目標の 0.1 sec は不可能であることを示した。この応答では、鋼管 1 本につき、2, 3 点の測定値が求まるのみで、肉厚分布やミル制御には不十分であると判定される。

以上の技術的検討から、本方式では使用目的に合致した実機化は不可能であると結論づけた。

## 2-2 マルチビーム方式 (第4章, 第5章)

スキャンニング方式では、実機化が困難であることが判明し、研究が行き止まりの状況にあるときに、考案創始された独創的な原理が、マルチビーム方式である。

この方式は、図2に示すように、3組の放射線源と検出器を用いて、3個の放射線を鋼管断面の肉厚部で相互に交差させるように配置して、その交差部の肉厚を求めるものである。相隣る2個の放射線が共通の肉厚部で必ず交差するとすれば、次の連立方程式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} X_1 + X_2 &= \frac{1}{\mu K} \ln \frac{N_1}{N_{10}} \\ X_2 + X_3 &= \frac{1}{\mu K} \ln \frac{N_2}{N_{20}} \\ X_3 + X_1 &= \frac{1}{\mu K} \ln \frac{N_3}{N_{30}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここで、 $X_1, X_2, X_3$  は放射線の交差する所の肉厚、 $N_1, N_2, N_3$  は測定時の検

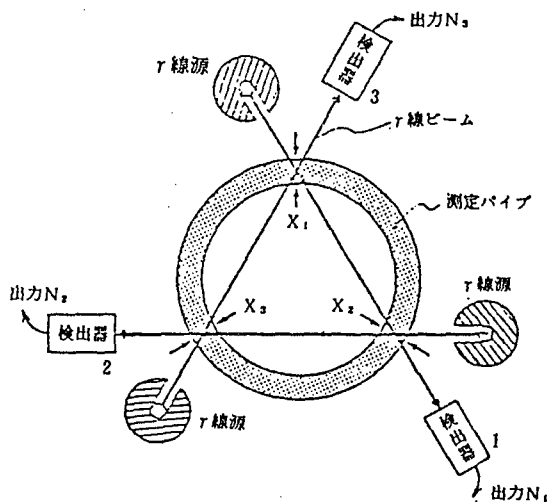


図2 マルチビーム方式原理図

出器出力,  $N_{10}$ ,  $N_{20}$ ,  $N_{30}$  は肉厚零の時の検出器出力,  $\mu$  は吸収係数,  $K$  は放射線の斜め透過長と肉厚との比である。 $N_{10}$ ,  $N_{20}$ ,  $N_{30}$ ,  $\mu$ ,  $K$  は既知であり, 測定により  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  も求められるので, (2)式は, 未知数  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  の 3 元連立方程式となり, 代数的にシングルウォール (一重の肉厚)  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  が求まる。

これが, マルチビーム方式の基本原理であるが, 3 個の放射線の場合に限らず, 一般に  $n$  個の放射線を使用した  $n$  点の肉厚測定にも成立することを証明した。

次に, この原理に基づく測定操作のモデル化と, それを前提として, ビーム幅, 芯揺れ (測定系の位置関係), 透過長と肉厚との関係等を誤差要因として取り上げ, 理論的考察を行い,

- (1) 放射線が理想ビームでなく, 幅を持っても連立方程式は成立する。
- (2) 芯揺れは, 精度に影響するが, その度合は, 解析的よりも実験的に求める方が容易である。
- (3) 透過長と肉厚との関係は, 予め公称内, 外径から計算により計算式を求めるか, あるいは, サンプルを用意しその測定により関係式を求める方法が有効である。

等を明確にした。

さらに, この理論的考察を基に, 芯揺れ誤差, 透過長から肉厚への変換誤差, ビーム幅の影響, スキャンニング方式では無視できた吸収係数  $\mu$  の変動, 最適測定点数等について実験装置とシュミレーションにより評価し,

- (1) 吸収係数  $\mu$  は, ディスクリミネータ電圧を最適設定し, コリメータを線源側, 検出器側に設けること, 特に検出器側を深くすることにより, パスライン変動, ダブルウォール測定に対し平坦度を確保できる。
- (2) 透過長から肉厚への変換は(1)の吸収係数  $\mu$  が平坦であれば, 誤差を十分小さくできる。
- (3) ビーム幅は測定分解能の許容しうる範囲で広くすることが, 統計動揺誤差の最小化に有効である。
- (4) 芯揺れによる誤差は大きく, 精度を  $\pm 0.1 \text{ mm}$  に収めるには, 芯揺れ量を  $\pm 1 \text{ mm}$  におさえる必要がある。
- (5) 最適な測定点数は, 演算による誤差と統計振動誤差から評価すると, 3 点で誤差最小となることを明らかにした。

最大の問題である芯揺れ誤差については, 最も信頼度の高い機械的に芯揺れを拘束するピンチロール方式を採用することにより, 最小化が可能であり, さらに, この方式は

- (1) 走査機構がないため, 高応答, 連続測定が可能で, 熱対策上も有利である。
- (2) 原理的に多点同時測定が可能である。
- (3) 代数的に解が求まるため, デジタル化により, 高い精度が期待できる。

等の利点を持っており, 実験装置による実験とその技術的考察から, 精度  $\pm 0.1 \text{ mm}$ , 応答  $0.1 \text{ sec}$  の実機化が可能であることを明らかにした。

### 3 実機設計と性能評価 (第 6 章)

実機設計に際しての実機仕様を表 1 に示す。基本設計としては, 精度, 応答に重点が置かれたが,

表1 実機仕様

項 目	実 機 仕 様	備 考
1 測定範囲	外径 177.8～426mm (7" ～ 16 3/4") 肉厚 5.0～40.5mm 長さ 5.5～19.5mm	中径継目無鋼管製造 範囲全般
2 鋼管温度	800℃～1000℃	リーラー後
3 搬送速度	2 m/sec	リーラー後
4 測定精度	± 0.1mm～± 0.2mm	肉厚20mm以下 ± 0.1mm 20～40.5mm ± 0.2mm
5 応答速度	0.1sec 以下	長手方向 200mmピッチ測定
6 測定点数	円周方向 3点以上	鋼管測定時間 10秒
7 耐 熱 性	1000℃の鋼管で 30secサイクル タイムに支障なきこと	圧延間隔 30秒
8 搬送ロール	レベル調整 0.1mm以下	搬送時の鋼管の揺動防止
9 鋼管芯振れ	上下・左右 ± 1mm以下	

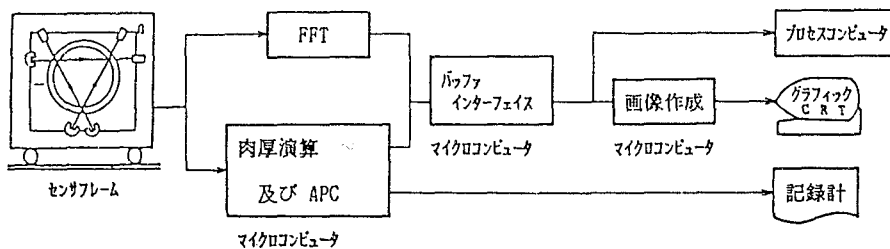


図3 機器構成図

実機設計では、耐熱、粉塵、水分、スケール等の耐環境性と高信頼性に重点が置かれ、最終的にまとめられた機器構成を図3に示す。実機に於ける新規性、独創性として、

- (1) マイクロコンピュータを大幅に採用し、信号処理の全面的デジタル化を行い、精度向上とドリフト防止を図った。
- (2) 独創的な偏肉解析システムを開発し、その中にリアルタイムFFTを導入した。
- (3) 零スパン調整の全自動較正とロットサイズ替の自動化により、タッチレスオペレーションを実現した。
- (4) 測定対象と測定系の幾何学的位置関係の再現性の向上のため、ピンチロール機構の採用と共に、線源、検出器のサイズ毎の位置決め精度 $\pm 10\mu$ を実現した。

等をあげ、その技術的内容と機器仕様を明らかにした。

次に線源  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$  を3個、 $\gamma$ 線検出器3個を使用した重量約10tの熱間肉厚測定装置を中径継目無鋼管工場に導入し、実践性能として、精度 $\pm 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 、応答0.1secが達成されたことをオフラインおよびオンラインデータにより実証した。

#### 4 適用技術と成果（第7章）

この熱間肉厚測定装置のプロセスへの適用に於ては、偏肉解析システムとミル制御の二つの面で

実用化された。前者は、主に偏肉情報を用い、継目無鋼管の各ミルの圧延特性に起因する偏肉の振幅と周波数の差異に着目し、鋼管一本毎の偏肉の解析結果を表示し、オペレータがそれに基づいて該当するミルに操作を加える開ループ制御である。後者は、熱間肉厚測定装置から得られる平均肉厚と長手方向肉厚パターン情報をミル制御モデルに入力し、そこからミルの最適設定値を出力する閉ループ制御である。ここでは主に塑性加工理論、および制御理論の面から、それらの基本概念と有効性を明らかにした。又、これらは、本研究により世界で初めて実用化をみたものであり、実データにより、最大偏肉率約2%、平均偏肉率1%の減少を含む歩留向上3%、生産性向上12%、省力21%等の大きな成果をあげたことを示した。

次に、理論面の貢献として特に、圧延中の肉厚の挙動や偏肉の発生状況が明らかにされ、継目無鋼管の塑性加工に新しい知見を与え、例えばリーラーの幅広がり理論、ピアサのプラグ振動論など、圧延理論の進展に寄与していることを示した。

## 5 結 言 (第8章)

継目無鋼管の製造技術は、その製造工程に3次元塑性加工プロセスを持ち、製造設備も複雑な装置からなり、そのプロセスの理論解析も不十分であったため、オペレータの勘を主体とする作業であると言う大きな問題が存在していた。そこで、熱間肉厚測定装置の研究とミル制御の開発を通じて、従来の作業を数値管理圧延の水準まで高める必要があった。ここに本研究の基本的な重要性があると言える。このような意味で、本研究が継目無鋼管の肉厚測定と制御に世界で初めて実用化の道を開いた意義は大きい。今後も関連する技術の一層の進歩により、本研究をもとにした広範にわたる応用研究が予想され、大きな寄与が期待される。例えば、検出器、演算装置の高速化、高精度化による大幅な性能向上とハード面のコストダウンにより、国内外の本装置の導入が加速され、継目無鋼管工場の完全無人化も夢でないと言える。

又、本研究の測定原理が複雑な断面形状の測定に有利なことから、形鋼や異形棒鋼の形状測定への応用も研究され、さらに今後、ビームと検出器の小型化が進めば、鋼管や形鋼の疵検出への応用も可能となると予想される。材質面からも、鉄鋼材料のみならず、プラスチック、セラミックス、複合材料等への展開も図られると思われる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

近年、石油危機を契機とする油井管などの需要増大に伴い、継目無鋼管の寸法精度の向上が要求されるようになってきた。しかし、継目無鋼管の熱間圧延工程は複雑な3次元塑性加工プロセスを有するため、鋼管肉厚の不均一いわゆる偏肉の発生が不可避とされ大きな問題となっていた。

著者は偏肉低減を達成する上で、肉厚をオンラインで測定することが重要であることに着目し、新しい熱間肉厚測定法を提案し実用化すると共に、プロセスに適用しその有用性を実証した。本論文はその成果をとりまとめたもので、全文8章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では熱間ラインでの鋼管肉厚測定に関する基礎的考察を行い、実用上考慮すべき事項及び問題点を明確にしている。その上で目標とする実機の性能を、精度  $0.1\text{ mm} \sim 0.2\text{ mm}$ 、応答速度  $0.1\text{ sec}$  と設定している。

第3章では1個の放射線源により鋼管を断面方向に走査し、その時得られる放射線減衰曲線の形から肉厚を求める新しい方法についての提案を行っている。

第4章では、前章で開発した方式を更に進展させ、3個の放射線源を鋼管断面の肉厚部で相互に交差させるように配置して、その交差部の肉厚を求めるマルチビーム方式と呼ばれる方法を提案している。次いで測定精度に影響を与えるいくつかの要因についても理論的考察を行い、実用化に役立つ有用な知見を得ている。

第5章では、マルチビーム方式による測定装置の実機化を前提として、測定条件や誤差などを定量的に評価するために実験装置を試作し、評価実験を行っている。その結果、本測定法が精度と応答速度の点で優れていることを明らかにすると共に、実機として十分実用化可能であることを確かめている。

第6章では、 $3\text{ Ci}$  の  $\text{Cs}$  線源を3個用い、重量約10tの熱間肉厚測定装置を開発設計し、継目無鋼管工場に導入の結果実機性能として所期の目標を達成できることを実証している。これは優れた成果である。

第7章では、熱間肉厚測定装置をプロセスコンピュータシステムに組み込み、継目無鋼管のオンライン偏肉解析システムを開発すると共に圧延機制御に活用し、偏肉の低減をはじめ寸法精度の向上を果たしている。

第8章は結言である。

以上要するに本論文は、これまで開発がなされていなかった、高精度と高速応答を具備する新しい熱間肉厚測定法を確立しその実用化に成功すると共に、継目無鋼管の肉厚測定と制御の基礎となる多くの有用な知見を加えたもので、計測制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。